

一种用于提供 QoS 保证的准入控制方法

傅晓明, 张尧学

(清华大学计算机系, 北京 100084)

摘 要: 本文推导了 ON/OFF 马尔可夫数据流的资源分配与延迟分布、丢失率的关系, 在此基础上进行可准入性测试, 并根据流的优先级大小给出一种优化的准入控制方法, 可为各类流提供服务质量 (QoS) 保证. 最后通过算例说明该方法的有效性.

关键词: 准入控制; 统计型服务质量; 资源分配; ON/OFF 马尔可夫流

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 10-0082-04

Admission Control for Providing Statistical QoS in High-Speed Networks

FU Xiao-ming, ZHANG Yao-xue

(Dept. of Computer Science & Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper presents an admission control scheme for providing Quality of Service (QoS) including delay tail distribution and loss probability in high-speed networks. The relationship between resource allocation for flows modeled by on/off Markovian fluids and statistical QoS is established based on an analysis of the Markov process. Using this theoretical result, the feasible test method of admission control for QoS provisioning is put forward. Our proposed admission control scheme is optimal in that it takes account of the relative precedence of flows and represents a requirement for maximizing network revenue, while providing delay tail distribution and loss probability guarantee for multiple classes flows. Its performance is investigated through numerical results.

Key words: admission control; statistical QoS; resource allocation; on/off Markovian fluid

1 引言

近年来, 因特网等计算机网络中音频、视频等实时应用的需求在急剧增长. 这些应用要求网络为它们提供一定的端到端服务质量 (QoS) 保证, 即希望使应用端到端的延迟、丢失率、抖动等性能指标处于一定范围^[1,3,6]. 一个会话中具有相同 QoS 要求的分组集合称为流. 为保证这些流的 QoS 要求, 必须解决如何在一定的资源条件下, 确定是否接纳新的流请求, 同时满足已有流的 QoS 的问题, 即对流实施准入控制^[3,10]. 流的准入控制有两种方式, 一是根据已知的端到端网络特性和所需要保证的 QoS, 由端到端直接准入控制, 如通过源端的流量控制等手段保证各类流不同的 QoS; 另一种是将准入控制分布在各端主机和路由器上, 根据端到端 QoS 的要求转换成的本地 QoS 参数, 确定各局部节点是否准入到达的流, 只要有一个节点无法准入, 则整个流无法准入, 需重新协商或退出. 由于第一种方式中的端到端网络特性一般难于获得, 本文侧重讨论以第二种方式实现端到端 QoS 保证时, 各节点处流的准入控制问题.

文献[3,5]通过有效带宽理论分析马尔可夫流的 QoS 要求与资源分配关系, 分别提出了基于延迟及丢失率 QoS 对应的有效带宽分析的准入控制策略. 文[8]在此基础上, 进一步

考虑了通用处理机共享 (GPS) 调度下准入控制的具体方法, 但无法处理同时具有延迟与丢失率要求的流的准入控制. GPS 调度的基本原理是, 事先为各类流分别预约一定的带宽 (占总带宽权重) 和缓冲队列容量, 然后在任意时刻, 为各非空队列中的流分配相应预约的带宽量, 而将其他未使用队列容量, 然后在任意时刻, 为各非空队列中的流分配相应预约的带宽量, 而将其他未使用各自预约量的流的剩余带宽, 按各非空队列预约量的比例关系分配给各非空队列中的流^[5].

本文用于提供 QoS 保证的准入控制方法如下: (1) 根据各类请求流的 QoS 要求与资源分配 (本文考虑带宽、缓冲区两种资源) 之间的映射关系, 得到可准入区. 用 ON/OFF 马尔可夫流模型来刻画流特性, 并通过分析流到达过程推导出该映射关系, 以此为依据判断可准入区; (2) 根据各类流之间的相对价格 (准入优先级) 关系, 以最大化网络收益为目标进行优化, 确定可准入区范围内每类流的有效准入数目. 该方法除了具有一般准入控制策略的功能之外, 还能根据应用的服务价格要求, 优化系统资源的使用, 提高网络系统的总体满意度. 全文安排如下: 首先分析准入控制问题及有关因素, 建立 ON/OFF 马尔可夫流模型刻画的流资源分配与延迟分布、丢失率的关系, 并在此基础上进行可准入性测试, 利用流的价格

参数,根据收益最大化原则给出准入数目,然后通过算例评价算法的流准入度及相应 QoS 性能.

2 准入控制问题

设 $f = (s, T, Q, w)$ 为一个流请求,其中 s 为流类型, T 为 f 的流特性, Q 为 f 的 QoS 要求, w 为 f 的价格参数, $0 \leq w \leq 1$, w 越大的流具有越高的准入优先权. 设系统中已有第 k 类流数目分别为 $N_{0,k}$ 且有 $N_{req,k}$ 个流发出准入请求, 其中 $1 \leq k \leq K$, K 为类型个数. 则流准入控制和资源分配要解决的问题是,如何根据流要求和可用资源的量,确定准入每类流准入的数目 $N_{adm,k}$. 与此密切相关的因素有链路的调度策略(先来先服务 FCFS,通用处理机共享 GPS,最早期限优先 EDF 等)、QoS 要求(丢失率、延迟分布等)和流模型(如泊松过程,ON/OFF 马尔可夫流等).

2.1 调度策略

假定链路调度策略为 GPS,因为它可为带不同 QoS 要求的各类流提供统计型 QoS 支持,且已广泛用于实际系统中. 设同一类流以 FIFO 方式服务,各类的权重为 $\{\phi_k\}_{k=1, \dots, K}$, 则 GPS 可保证任何非空缓冲队列 k 的服务速率至少为 $r \cdot \phi_k / \sum_{j=1}^K \phi_j$, 其中 r 为链路容量,如图 1 所示.

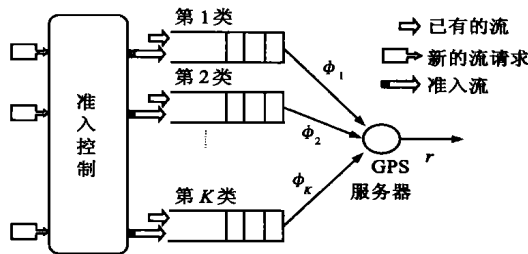


图 1 GPS 调度策略与准入控制

2.2 QoS 特性

记第 k 类流的 QoS 要求为 (L_k, D_k, E_k) , 其中 L_k 为允许的丢失率上限, D_k 为允许的延迟上限, E_k 为延迟超过上限 D_k 的允许概率,则丢失率和(排除)延迟分布 QoS 可表为:

$$Pr\{X_k > B_k\} \leq L_k \tag{1}$$

$$Pr\{d_k > D_k\} \leq E_k \tag{2}$$

其中, X_k 为第 k 类缓冲区中的稳态分组数, B_k 为第 k 类缓冲队列的大小, d_k 为第 k 类流的排队延迟.

2.3 流模型

假定流模型为许多实时媒体流均可作近似等效的 ON/OFF 马尔可夫流^[4]. 记一个用 ON/OFF 马尔可夫流模型刻划的流为 $T = (v, 1/\mu, 1/\lambda)$, 其发送端处于两种状态:ON 状态时以恒定速率 v 发送数据,OFF 状态不发送;ON 与 OFF 状态的持续时间分别服从均值为 $1/\mu$ 和 $1/\lambda$ 的指数分布.

3 QoS 要求与资源分配的关系

基于 ON/OFF 马尔可夫流模型分析可得丢失率和延迟分布与资源分配的关系.

设经准入控制后第 k 类流的总数目为 $N_k = N_{0,k} + N_{adm,k}$. 下面分析服务器容量为 c 、缓冲队列大小为 Q 时,缓

冲队列 k 的状态转换规律,并简记 N_k 为 N . N 个马尔可夫流 $(v, 1/\mu, 1/\lambda)$ 共有 $(N+1)$ 种可能状态,每种状态对应一种到达速率. 设由状态 i 转换为状态 j 的速率为 $g(i, j)$, 则到达过程可表示如下:

$$G(i, i+1) = (N-i)\lambda, 0 \leq i < N \tag{3}$$

$$g(i, i-1) = i\mu, 0 < i \leq N \tag{4}$$

见图 2 所示.

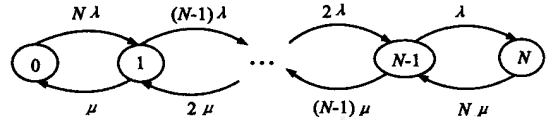


图 2 N 个 ON/OFF 马尔可夫流的状态转换图

记平均到达概率为 m , 处于状态 i 的稳态概率为 π_i , 状态 i 的总离开速率为 $g^*(i), 0 < i \leq N$, 则

$$M = \lambda / (\mu + \lambda) \tag{5}$$

$$\pi_i = \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^i \binom{N}{i} / (1 + \frac{\mu}{\lambda})^N \tag{6}$$

$$g^*(i) = g(i, i+1) + g(i, i-1) = (N-i)\lambda + i\mu, 0 \leq i \leq N \tag{7}$$

令 $W_i(t, q)$ 为在时刻 t , 处于状态 i 且队列长度不超过 q 的稳态概率, 其中 $0 \leq i \leq N, t \geq 0, 0 \leq q \leq Q$, 并设 Δt 为小的时间间隔. 则

$$\begin{aligned} W_i(t + \Delta t, q) = & W_{i-1}(t, q - (i - c/v) \cdot \Delta t) \cdot g(i-1, i) \Delta t \\ & + W_{i+1}(t, q - (i - c/v) \cdot \Delta t) \cdot g(i+1, i) \Delta t \\ & + W_i(t, q - (i - c/v) \cdot \Delta t) \cdot [1 - g^*(i) \Delta t] \\ & + o(\Delta t) \end{aligned} \tag{8}$$

将 $W_i(t, q - (i - c/v) \cdot \Delta t)$ 项移至等式左边, 然后两边分别除以 Δt 并令 $\Delta t \rightarrow 0$. 可得

$$\begin{aligned} \partial W_i(t, q) / \partial t + (i - c/v) \partial W_i(t, q) / \partial q \\ = g(i-1, i) W_{i-1}(t, q) + g(i+1, i) W_{i+1}(t, q) \\ - g^*(i) W_i(t, q) \end{aligned} \tag{9}$$

记 $F_i(q)$ 为与时间无关的处于状态 i 且队列长度不超过 q 的稳态概率, 即 $F_i(q) = \lim_{t \rightarrow \infty} W_i(t, q)$, 且 $\partial F_i(q) / \partial t = 0$. 则由式(9)可得

$$\begin{aligned} (i - c/v) dF_i/dq = g(i-1, i) F_{i-1}(q) + g(i+1, i) F_{i+1}(q) \\ - g^*(i) F_i(q), 0 \leq q \leq Q \end{aligned} \tag{10}$$

该状态方程可写为如下矩阵形式:

$$F(q) = AF(q) \tag{11}$$

其中, $F(q) = (F_0(q), F_1(q), \dots, F_N(q))^T$, $A = R^{-1}M$, R 为对角矩阵, 各对角元素分别为 $-c/v, 1 - c/v, 2 - c/v, \dots, N - c/v$;

$$M = \begin{bmatrix} -g^*(0) & g(1,0) & 0 & 0 & 0 & \dots \\ g(0,1) & -g^*(1) & g(2,1) & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots \\ \dots & \dots & 0 & g(N-2, N-1) & -g^*(N-1) & g(N, N-1) \\ \dots & \dots & 0 & 0 & g(N-1, N) & -g^*(N) \end{bmatrix}$$

方程(11)的解为

$$F(q) = e^{Aq}H \tag{12}$$

其中 H 为常数列向量,其值由如下边界条件确定:

$$F_i(0) = 0, \quad \lfloor c/v \rfloor < i \leq N \quad (13)$$

$$F_i(Q) = 0, \quad 0 \leq i \leq \lfloor c/v \rfloor \quad (14)$$

然后利用 $F(q)$ 求得延迟分布和丢失率的表达式. 队列长度的总体分布有如下关系:

$$Pr(\text{队列长度} \leq q) = \sum_{i=0}^q F_i(q) \quad (15)$$

根据 FIFO 队列长度与分组排队延迟之间的关系,可得

$$Pr(\text{延迟} \leq D) = 1 - (1/mN) \sum_{i=0}^N i F_i(c \cdot D/v) \quad (16)$$

$$\text{即 } Pr(\text{延迟} > D) = (1/mN) \sum_{i=0}^N i F_i(c \cdot D/v) \quad (17)$$

而

$$Pr(\text{队列长度} > Q) = (1/mN) \sum_{i=\lfloor c/v \rfloor + 1}^N (i - c/v) F_i(Q) \quad (18)$$

从而,式(1)与(2)描述的 QoS 要求可写为:

$$(1/m_k N_k) \sum_{i=\lfloor c/v_k \rfloor + 1}^{N_k} (i - c/v_k) F_i(B_k) \leq L_k \quad (19)$$

$$1 - (1/m_k N_k) \sum_{i=0}^{N_k} i F_i(c_k \cdot D_k/v_k) \leq E_k \quad (20)$$

其中 $m_k = \mu_k / (\lambda_k + \mu_k)$. 式(19)与(20)反映了 QoS 要求与资源分配之间的内在关系,构成可准入区的判断条件.

4 本文的准入控制方法

[测试 1]第 k 类流准入测试 class_test(k)

$$c_k = r \cdot \phi_k / \sum_{i=1}^K \phi_i;$$

for $j = 1$ to $N_{req, k}$ do

$$\text{if } \{ 1 - (1/m_k N_k) \sum_{i=0}^{N_k} i F_i(c_k \cdot D_k/v_k) > D_k \}$$

$$\text{or } \{ (1/m_k N_k) \sum_{i=\lfloor c/v_k \rfloor + 1}^{N_k} (i - c/v_k) F_i(B_k) > L_k \}$$

then return ($j - 1$) and stop;

endifor;

return ($N_{req, k}$) and stop.

[测试 2]可准入测试 feasible_test

= ;

for $j = 1$ to K do

for $k = 1$ to j do

$$N_{max}(k) = \text{class_test}(k);$$

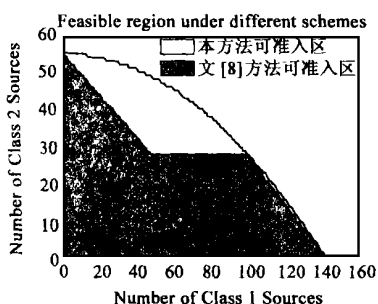


图 3 可准入区(指标:丢失率)

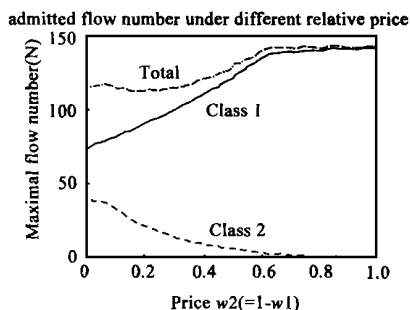


图 4(a) 相对价格对准入数目的影响

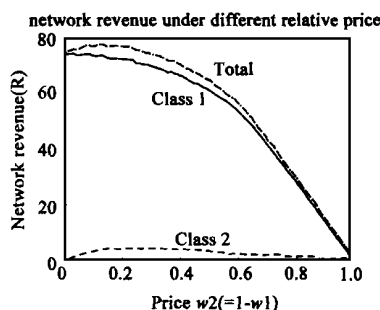


图 4(b) 相对价格对网络收益的影响

资源情况如下:可使用的总链路带宽 $r = 100$,缓冲区大小 $B_1 = 100, B_2 = 10$,GPS 权值 $\phi_1 = 0.5, \phi_2 = 0.5$.用 Matlab 5.1

endifor;

$$= \{ (N_{max}(1), N_{max}(2), \dots, N_{max}(K)) \}$$

endifor;

return and stop.

由测试 2 可得给定缓冲区分配 $\{ B_k \}$ 和 GPS 权值

$$\{ \phi_k \}_{k=1, \dots, K} \text{ 下的可准入区 } = \{ (N_1, N_2, \dots, N_K) \mid 1 - (1/m_k N_k) \sum_{i=0}^{N_k} i F_i(c_k \cdot D_k/v_k) \leq D_k \text{ and } (1/m_k N_k) \sum_{i=\lfloor c/v_k \rfloor + 1}^{N_k} (i - c/v_k) \cdot F_k(B_k) \leq L_k, 1 \leq k \leq K \}.$$

考虑如下一种“最优”的准入控制方案.已有研究大多集中于提高网络利用率方面,但实际上网络关心准入后的收益情况.用户向网络提交价格参数是准入优先权的反映,从网络收益最大化的角度看,希望根据各类用户提交的价格参数 $\{ w_k \}_{k=1, \dots, K}$,选择适当的 $\{ N_k \}_{k=1, \dots, K}$,使网络收益函数 $R = \sum_{k=1}^K w_k \cdot N_k$ 最大化.归一化各价格参数为 $\sum_{k=1}^K w_k = 1$,并记第 k 类用户的需求函数为 $x_k(w_k)$.一般地,价格越高,需求越小.本文采用如下的需求函数形式^[7]:

$$x_k(w_k) = A_k \exp(-\epsilon_k \cdot w_k), 1 \leq k \leq K \quad (21)$$

其中, A_k 为常数, $\epsilon_k \geq 0$ 称为价格弹性系数, ϵ_k 越大,提高相同幅度价格 w_k 时需求下降的幅度也越大.于是收益最大化问题成为:

$$\text{Maximize } \sum_{k=1}^K w_k \cdot N_k \quad (22)$$

$$\text{s. t. } (N_1, N_2, \dots, N_K)$$

$$N_k \leq A_k \exp(-\epsilon_k \cdot w_k), 1 \leq k \leq K$$

优化问题(22)的解法可参见有关非线性规划的文献,如文[4]等.记其解为 $(N_1^*, N_2^*, \dots, N_K^*)$,则网络最终准入各类流的数目为 $\{ N_k^* - N_{0k} \}_{k=1, \dots, K}$.

5 算例分析

假定有表 1 所示的两类流:

表 1 两类流的例子

流	流特性($\lambda, 1/\mu, v$)	QoS 要求(L, D, E)	其它参数(w, A)
类型 1	(0.025, 0.045, 1)	($10^{-3}, 10, 10^{-3}$)	(0.5, 1, 200)
类型 2	(0.500, 0.500, 2)	($10^{-9}, 20, 10^{-8}$)	(0.5, 4, 50)

相对价格对本文方法流准入率和网络收益的影响.从图中可以看出,在同样的网络条件下,该方法的准入区比文[8]大(见图3).计算结果表明,相对准入优先权(价格)可以作为控制负载的一种手段,本例中随着第2类流相对优先权的增大,虽然第2类流的准入数目有所下降,但第1类流的数目却有上升,从而总体准入度提高,但超过一定阈值后,无法进一步提高(见图4(a));与此同时网络收益也随之变化,先上升到一个上限,然后逐渐下降(见图4(b)).

6 结论

本文提出一个基于统计型 QoS 的准入控制方法,利用流的丢失率和延迟分布要求与资源要求的关系及负载优化,改善流准入度和提高网络收益.还有一些更深入的问题需要进一步研究,例如如何考虑流的延迟抖动要求,降低计算复杂度等.

参考文献:

- [1] Firoiu V, Kurose J, Towsley D. Efficient admission control of piecewise linear traffic envelopes at EDF schedulers [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1998, 6(5): 558 - 570.
- [2] Elwalid A, Debasis M. Effective bandwidth of general markovian traffic sources and admission control of high speed networks [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1993, 1(3): 329 - 343.
- [3] Lee H and Nemoto Y. Providing the statistical QoS objectives in high-speed networks [J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1997, 29(16): 1919 - 1931.
- [4] Luenberger D G. Linear and Nonlinear Programming (2nded.) [M], Reading, MA: Addison-Wesley, 1984.
- [5] Parekh A K, Gallager R G. A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: The single-node case [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1993, 1(3): 344 - 357.

- [6] Perros H G, Elsayed K M. Call admission control schemes: A Review [J]. IEEE Commun Mag, 1996, 34(11): 82 - 91.
- [7] Varian H. Microeconomic Analysis (3rded.) [M]. New York: W. W. Norton & Company, 1992.
- [8] Zhang Z-L, Zhen L, Kurose J, Towsley D. Call admission control schemes under generalized processor sharing scheduling [J]. Telecomm Systm, 1997, 7: 125 - 152.
- [9] 傅晓明, 张尧学等. 一种基于市场模型的网络带宽分配方法. 电子学报, 1999, 27(9): 127 - 129.
- [10] CHEN Hua, ZHANG Yao-xue, CHEN Kang-fu. Multimedia Quality-of-Service (QoS) classification and negotiation manager [J]. Chinese Journal of Electronics, 1998, 7(1): 44 - 48.
- [11] ZHANG Yao-xue, CHEN Hua et al. The design and implementation of a QoS control mechanism based on perceptual time channel [J]. Journal of Japanese Information Processing Society, 1999, 40(9): 3564 - 3576.

作者简介:



傅晓明 1973 年出生, 1994 年和 1997 年分别获学士和硕士学位, 现为清华大学计算机系博士生, 主要研究领域为因特网中端到端的服务质量控制, 网络资源管理等。



张尧学 1956 年出生, 工学博士, 清华大学计算机系教授, 博士生导师, 主要研究方向为高速网络互连, 网络协议工程, 网络服务质量和网络操作系统等。

(上接第 88 页)

参考文献:

- [1] N. Abramson. The throughput of packet broadcasting channels [J]. IEEE Trans. on Communications, 1977, 25(1): 117 - 128.
- [2] N. Abramson. VAST data networks [C]. Proc. IEEE [A], 1990, 78(7): 1267 - 1274.
- [3] N. Abramson. Multiple access in wireless digital networks [A]. Proceedings of the IEEE [C], 1994, 82(9): 1360 - 1368.
- [4] 林生. 计算机通信网原理 [M]. 西安市: 西安电子科技大学出版社, 1995
- [5] 方再根. 计算机模拟和蒙特卡洛方法 [M]. 北京市: 北京工业大学出版社, 1988
- [6] J. M. Holtzman. A simple, accurate method to calculate spread spectrum

multiple access error probabilities [J]. IEEE Trans. on Communications, 1989, 40(7): 1223 - 1230.

- [7] H. Okada, T. Sato et al. CDMA unslotted ALOHA systems with packet retransmission control [J]. IEICE Trans Fundamentals, 1996, E79 - A(7).
- [8] G. L. Turin. The effects of multipath and fading on the performance of direct-sequence CDMA systems [J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communication, 1984, SAC-2(4): 597 - 603.
- [9] Pickholtz et al. Theory of spread-spectrum communications — A tutorial [J]. IEEE Transactions on Communications, 1982, 30(5): 855 - 884.
- [10] J. Y. N. Hui. Throughput analysis for code division multiple accessing of the spread spectrum channel [J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communication, 1984, SAC-2(4): 482 - 486